

# ゲルマニウム検出器群ステージと PWO ケースの設計

○千賀信幸、田村裕和、小池武志、三輪浩司、白鳥昂太郎、細見健二、山本剛史

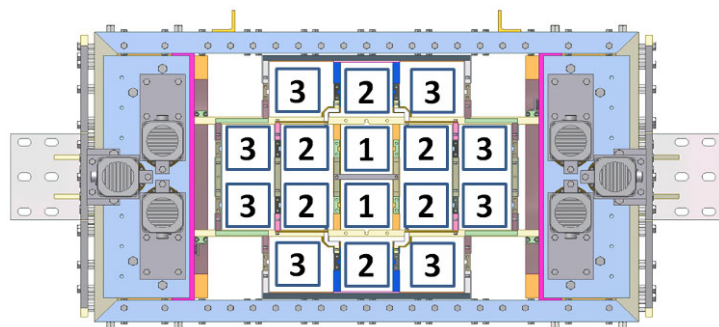
東北大学大学院理学研究科

## 1 ゲルマニウム検出器群 (Hyperball-J:HBJ) と、その構造

ゲルマニウム (Ge) 検出器とは、 $\gamma$ 線のエネルギーを高分解能で測定する事ができる検出器である。そのため、核物理学で使用されるばかりではなく、核種の同定や定量化にも用いられている。一方で Ge 検出器は、その特性上、液体窒素で冷却しなければならない。そこで、我々は長期間メンテナンスフリーの小型冷凍機を富士電機システムズと共同開発を行った<sup>[1]</sup>。HBJ とは、それらの冷凍機付き Ge 検出器を 32 台使用しハイパー核を精密に測定するための検出器群である。HBJ を用いた実験は、茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 (J-PARC) で行われ、J-PARC 最初の  $\gamma$ 線分光実験として注目を集めている。HBJ の構造は、冷凍機付き Ge 検出、PWO サプレッサー (PWO ケース)、ステージ、ステージ駆動機構<sup>[2]</sup>、磁気シールド<sup>[2]</sup>、メインフレームから構成される。ステージは可動式の 3 段構造となっており、各ステージが独立に可動する。この可動機構により、Ge 検出器をターゲットに対して平面状に配置、または疑似球面上に配置し、様々な実験で使用される予定である。

## 2 ステージの構造

HBJ のステージは上下共に 3 段 (計 6 ステージ) から構成される。図 1 に Ge 検出器の配置と可動箇所を示す。同一番号の Ge 検出器が同一ステージに取り付けられる。また、各ステージは独立に駆動し、Ge 検出器の検出器部を平面上に配置、または、ターゲットを中心に Ge 検出器を疑似球面状に配置することが出来る。設計上の球面形状は、ターゲットを中心に短軸 140mm、長軸 262mm (Ge 検出器の中心とする) の楕円形状となる。ステージの設計上の可動範囲は、3 ステージ全体では 678mm、その中で各ステージの最大移動量は 150mm とした。全体を移動できるようにした理由は、検出器のメンテナンスを容易に行うためである。各ステージの設計は、上面から見たステージの面積を最小にするように設計を行った。



1 内側ステージ、 2 真中ステージ、 3 外側ステージ

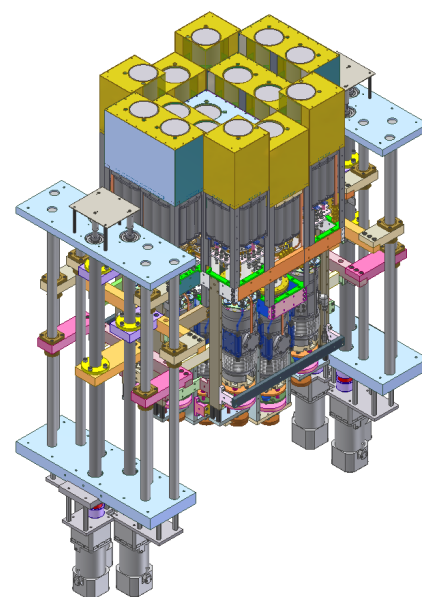


図 1 Ge 検出器の配置と可動箇所 (左) と疑似球面の形状 (右)

## 2.1 内側ステージの設計と構造

内側ステージには、2 台の Ge 検出器と一つの PWO ケース（8 の字型）が取り付けられる。冷凍機付き Ge 検出器の重量は、1 台約 20kg あり、2 台で約 40kg となる。一方、PWO ケースの重量は、約 35kg（PWO：20kg、光電子増倍管（PMT）：8kg、冷却板：2kg、PMT 用磁気シールド：2kg、SUS304 ケース：3 kg）程度である。設計は、この荷重をサポートし、かつ撓みを 0.1mm 以下に抑える構造とした。設計を行うにあたり、初めに材料の選定を行った。材料は非磁性体で加工が容易、かつ強度の強い A2017 を用いる事にした。梁の撓み計算は、機械設計便覧に記載されている式（均等荷重）を用いて行った。計算方法は以下の通りである。

$$\delta = \frac{Pl^3}{384EI} \quad [\text{mm}] \qquad I = \frac{ah^3}{12} \quad [\text{mm}^4] \qquad h = \sqrt[3]{\frac{P}{32E\delta a}} \times l \quad [\text{mm}]$$

ここで、 $\delta$  は撓み量、 $P$  [N] は荷重、 $E$  は縦弾性係数、 $a$  は板厚（15mm）、 $l$  は梁の長さ（760mm）とし、梁に加わる荷重を 40kg として計算した。その結果（ $h=41.49\text{mm}$ ）から、幅を 40mm とする事にした。内側ステージの形状は、Ge 検出器の設置条件から「H 型」とする事にした。梁の接合に使用するボルトは、荷重に対して十分な強度のある SUS316 製 M6 六角穴付きボルトとした。また、Ge 検出器を設置する梁は、隙間と強度の都合により SUS316 製 M4 六角穴付きボルト 9 本を用いる事とした。この梁は、その他、ステージには PWO ケースを取り付けるネジ穴や、Ge 冷凍機から延びるインータンスチューブの逃げ溝もある。設計が終了後、確認のための構造計算を行った。計算コードは、ANSYS Workbench、Autodesk Inventor Professional 2010 で行った。計算条件は、Ge 検出器取り付け部に各 40kg、PWO ケース取り付け部に 40kg とした。以下に構造計算の結果を示す。両者とも、有限要素法を用いたシミュレーションで、変形量についてはほぼ同じ値となった。応力の違いは、材料特性データが線形、非線形の違いに起因する。なお、変形形状に違いはなかった。

表 1 計算コードによる違い

	ANSYS	Inventor
ノード数	192240	118998
最大応力 (MPa)	45	69
最大撓み (mm)	0.30	0.31
安全率	>10	>10

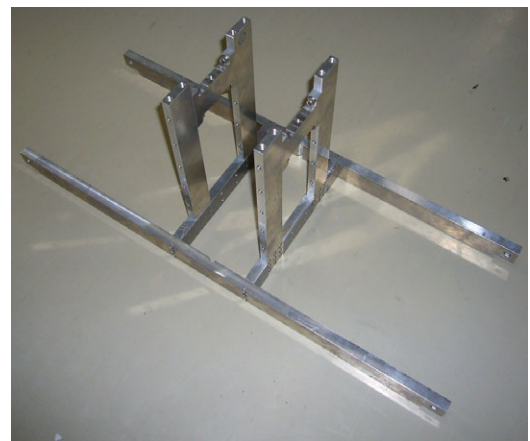


図 2 製作した内側ステージ

## 2.2 真中ステージの設計と構造

真中のステージは、Ge 検出器が 6 台、PWO ケース（E 型、コ型）が取り付けられる。真中ステージへ加わる荷重は、全体で約 180kg である。真中ステージの設計条件は、この荷重に耐え、かつ内側ステージと外側ステージとの間に収まらなければならない。そこで、内側ステージの梁を避ける構造とした。また、Ge 検出器に取り付けられる冷凍機のコネクタを避けるための構造も取り入れた。梁の幅は、内側ステージの計算方法より、50mm とした。材質は A2017 とした。Ge 検出器取り付け部は、5mm

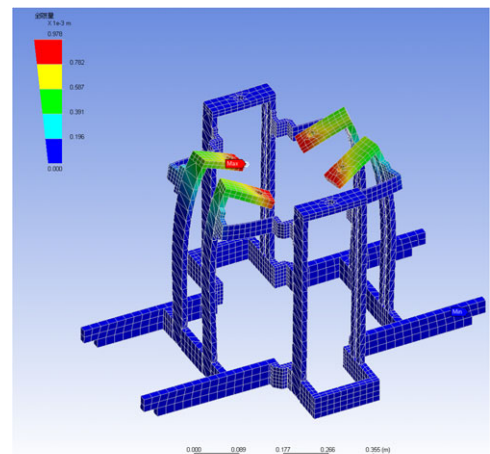


図 3 真中ステージの構造計算

厚の板により隣と接続することで荷重による変形量を 1/4 に減らし、さらに強度を増す構造とした。この構造により、Ge 検出器を安定に固定する事ができるようになった。図 3 に構造計算による変形形状を示す。計算条件は、Ge 検出器部に各 30kg（合計 180kg）、PWO ケース取付け部に 120kg とした。なお、荷重は安全を考慮して実際の約 2 倍（安全側で考慮）とした。構造計算による最大変形量は 1mm となった。しかし、この変形量は過大に見積もったものであり、実際は 1/5 程度に収まると考えられる。この時の安全係数は 7 となった。ステージを組み立てるネジの材質は、強度のある SUS316 とした。ステージの梁には配線や配管を固定するためのネジ穴を多数開けた。

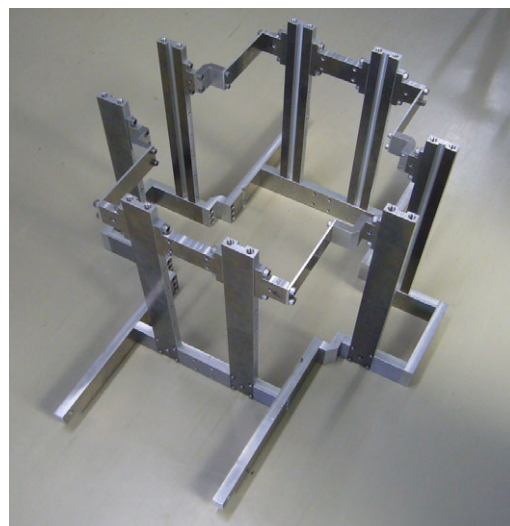


図 4 製作した真中ステージ

### 2.3 外側ステージの設計と構造

外側ステージは、Ge 検出器が 8 台、PWO ケース（E 型、L 型）が取り付けられる。外側ステージへ加わる荷重は、全体で約 280kg である。外側ステージは、フレームと真中ステージとの間に位置し、フレームとの干渉に注意して設計を行わなければならない。また、約 280kg の荷重に耐える構造でなければならない。そこで、外側ステージに使用する板幅は、荷重に対して十分な強度を持つ 50mm とした。一方、ステージの大きさは Ge 検出器の配置上、フレームとほぼ同等（フレームとの隙間は 3mm）となった。フレームは溶接製のため、わずかに変形している可能性もある。駆動範囲内での干渉の可能性は補強板のみである。わずかにフレームと干渉した場合は、補強板の板厚を薄くし対処できる構造となっている。ステージを組み立てるネジは SUS316 製 M8 を接合面に各 3 本ずつ使用している。また、ステージの至る箇所に配線、配管固定用のネジ穴が開いており、各種センサーも取り付ける事が可能である。設計した外側ステージの構造計算を図 5 に示す。計算条件は、Ge 検出器部に各 30kg（合計 240kg）、PWO 取り付け部に 180kg とした。この荷重は、安全を考慮して実際の約 1.5 倍となっている。Ge 検出器を取り付ける梁は、補強板により隣の梁と接続されている。構造計算の結果から、補強板を取り付けた場合は、取り付けない場合に比べて変形量を約 1/5 にすることができた。この時の最大変形量は 1.9mm、安全率は 4.6 となった。これらの結果から、外側ステージは荷重に耐えることができ、破損の恐れがないことが分かった。また、Ge 検出器部の変形については、Ge 検出器の固定法の都合（検出器の上下で固定）により計算結果の 1/5 程度であると考えられる。

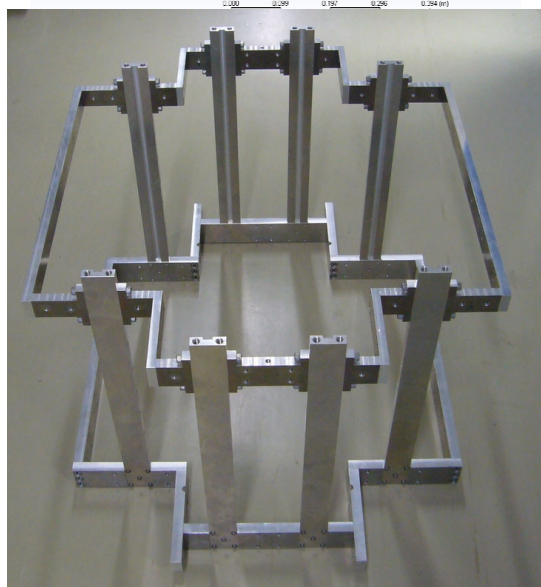
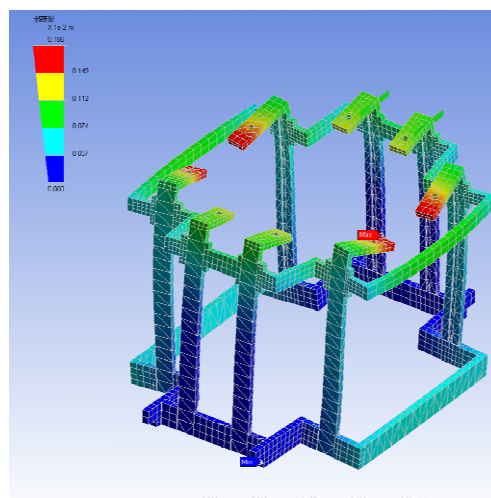


図 5 外側ステージの構造計算（上）と製作した外側ステージ

### 3 PWO ケースとは

PWO ( $\text{PbWO}_4$ ) 結晶とは、有効原子番号が 76 の重くて透明な単結晶である。PWO 結晶の特徴は、崩壊定数が 6ns と短いことにある。これは、一般的な放射線検出器に用いられている  $\text{NaI(Tl)}$  結晶 (250ns) の 40 倍以上である。しかし、室温で使用する場合は発光量が少なくノイズレベルが相対的に上がる。PWO 結晶を差プレッサーとして使用するには、冷却機構が必要不可欠である [3]。PWO ケースは、PWO 結晶を格納し冷却するための箱である。PWO ケースの構造は、ケースの中心から Ge 検出器、PWO 結晶サポート、断熱材、PWO 結晶、冷却板、断熱材、容器 (外壁) となっている。Ge 検出器以外は全てケース内に装填される。PWO ケースは、4 種類 (8 の字型、E 型、コ型、L 型) あり、最終的に「ユニット」としてステージに取り付けられる。取り付けの際は、PWO 容器上面のフランジ部をステージへ固定する。

#### 3.1 「8 の字型」 PWO ケースの設計と構造

8 の字型 PWO ケースは、内側ステージ下部へ取り付けられる。名称は PWO 結晶の配置が 7 セグメント LED の「8」の字型となっていることから付けられた。8 の字型 PWO ケースの設計を行うに当たり、初めに容器の設計を行った。容器の設計条件は、非磁性体で荷重に耐え、錆びない事である。そこで、材質は溶接性が良く強度もある SUS304 とした。板の厚さは、構造計算から、1.5mm とした。ステージへの固定方法は、容器上部に付いているフランジを六角穴付きボルト

(M8) で固定する。容器とフランジは、SUS304 製等辺アングル 20×t3 で接続されている。等辺アングルは、光電子増倍管 (PMT) 用磁気シールド (鉄管) との干渉を避けるための逃げ加工が施されている。この加工により、水平方向の強度が低下したことから、メンテナンス等で容器を反転させる場合は注意が必要である。一方、引張り強度は十分にあることから、ステージへの取り付けは問題ない。8 の字型に使用する PWO 結晶は、21 本 (40×20 : 13 本、34×20 : 6 本、31×20 : 2 本)、合計重量約 22.7kg となっている。8 の字 PWO 容器上面にネジ止め後付けされるフランジ (磁気シールド) は、PMT 光電面の磁気シールドと

PWO 結晶をサポートする役割を果たす。磁気シールドには、PMT 設置用の  $\phi 34$  の穴が開いている。この穴は、磁気シールド上部から見た PWO 結晶の上面表面積が最大になるように開いている。PWO 結晶サポート用の溝には、断熱材 (ゲルシート : 3mm 厚) が入る構造となっている。磁気シールドの材質は、透磁率の高い純鉄とし、板厚は、磁場の遮蔽性、製作製、干渉等を考慮し 16mm とした。8 の字型磁気シールドは、中央部から 2 つに割れる構造となっている。これは、メンテナンス時における PWO 冷却板との干渉を避ける

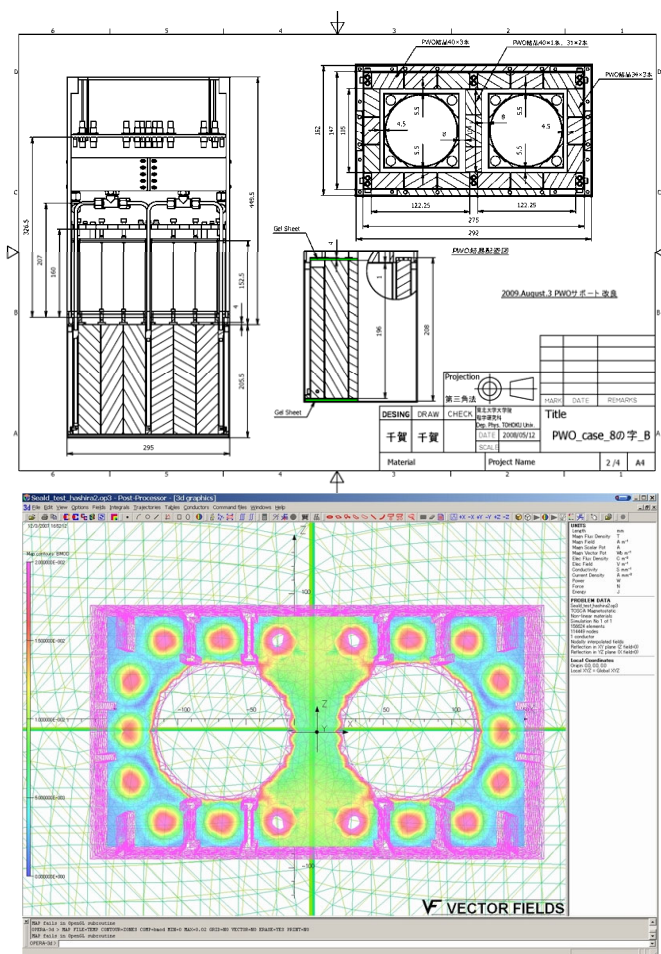


図 6 8 の字型 PWO ケースの図面 (上) と磁気シールドのシミュレーション (下)

ためである。磁気シールドは、8の字型容器へネジ止めされる。電磁石（SKS）への吸着力は、 $\mu_0$ ：真空の透磁率、B：磁束密度、S：表面積とすると、Maxwell Stress の式

$$P = \frac{B^2}{2\mu_0} \text{ [N/m}^2\text{]} \quad N = PS \text{ [N]}$$

より求める事が出来る。磁気シールドですべての磁場が吸収されると仮定し、500[Gauss]の一定磁場と仮定すると、最大吸着力は、44.8N (4.6kg) となる。この力は、水平方向での強度が落ちた8の字 PWO 容器でも十分に耐える。一般的な PMT の磁場中での動作限界は数[Gauss]である。HBJ 内側の磁場は、500~200[Gauss]程度であり、磁気シールドによって磁場を 10[Gauss]以下に落とさなければならない。そこで、磁場専用のシミュレータ (TOSCA) を用いて設計した磁気シールドのシミュレーションを行った。その結果、PMT 光電面において最大約 50[Gauss]となった。これは、一般的な PMT の動作限界を超えているが、PWO 結晶に使用する PMT の光電面は、約 1inch と小さいことから動作する可能性もある。磁場については、シミュレーション通りにならない事が多く、実際に製作し、設置して確かめる事が重要である。

8の字 PWO ケースは、上記した容器、磁気シールドの他に、アクリルタワー、PMT 鉄管、コネクタブラケット等が取り付けが、これらは以降の節に書く事とする。なお、8の字 PWO ケース全体の設計重量は、約 40kg となった。



図7 製作した8の字 PWO ユニットの仮組み

### 3.2 「E型」PWO ケースの設計と構造

E型 PWO ケースは、真中ステージ、外側ステージ下部へ取り付けられる。名称は PWO 結晶の配置が「E」の字型となっていることから付けられた。設計した E 型 PWO 容器の構造は、8の字型 PWO 容器の長辺（片側一方）を無くした構造となっている。PWO 結晶は 15 本（40×20：2 本、34×20：11 本、31×20：1 本、25×20：1 本）となっている。また、結晶の重量は 14.7kg となっている。E 型 PWO 容器は、Ge 検出器から見た空間に占める物質を減らす観点から、8の字型 PWO ケース側の一面が無い構造となっている。従って、容器底面の変形は大きい。

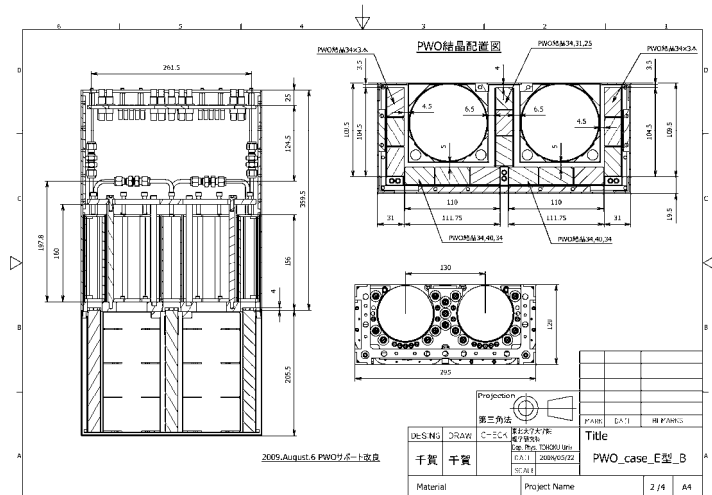


図8 設計した E 型 PWO ケースの図面

底面の変形が大きいと、PWO 結晶と PMT の接続が不安定となり、また隣接する PWO ケースとの干渉する。そこで、板の無い場所へ 30mm 幅の板を取り付け（溶接し）「磁気シールドで引っ張る」ことで変形を抑える構造とした。構造計算から、板のある場合と無い場合の変形は 0.16mm、0.74mm となり、約 1/5 に改善する事が分かった。この構造を採用するに当たり、メンテナンスを床（卓上）で行う必要がある。PWO

ケースのメンテナンスは、ステージや内部構造が密であることから、ステージへ取り付けて行う事は非常に難しい。従って、この構造は有効である。容器からは、4本の等辺アングル 20×t3 が容器フランジ面へ延びている。この等辺アングルは、8の字型 PWO 容器と同様の仕様となっている。容器フランジ面は、ステージへ取り付けるための穴が多数開いている。なお、容器の材質は非磁性体の SUS304 とした。容器へ後付けされる磁気シールドは、背面に PWO サポート用溝、上面に PMT 鉄管サポート用ネジ穴、また PMT 用  $\phi 34$  の穴、Ge 検出器用  $\phi 90$  が開いている構造である。E 型 PWO ケース用磁気シールドの磁場シミュレーションは行っていないが、8の字型と同等と考えられる。なお、E 型 PWO ケース全体の重量は、約 35kg である。

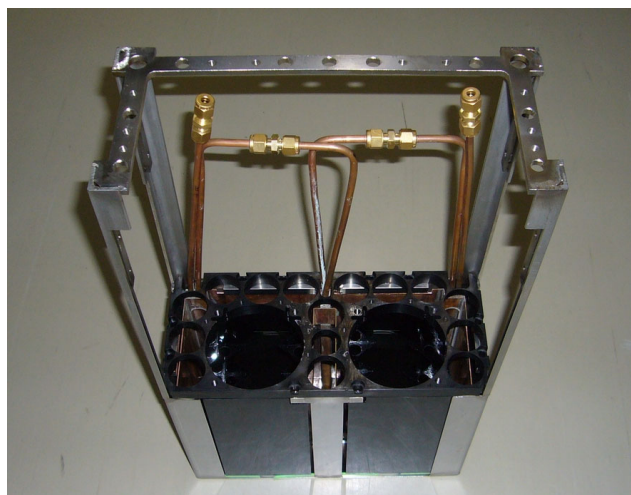


図9 製作した E 型 PWO ケース

### 3.3 「コ型」 PWO ケースの設計と構造

コ型 PWO ケースは、真中ステージの左右に取り付けられる。名称は、PWO 結晶の配置が「コ」の字型となっている事から付けられた。設計したコ型 PWO 容器は、ターゲット側に板を無くした構造となっている。この構造は、Ge 検出器から見た空間へ占める物質量を減らし、かつ容器内の遮光、変形も考慮されている。コ型 PWO 容器は、E 型 PWO 容器と違い、荷重部に等辺アングルがあるため底板の変形は小さい。断熱シートを挿入する隙間は、「8の字型」、「E 型」とほぼ同じ 5mm とした。使用する PWO 結晶は、34×20mm を 9 本 (約 8.8kg) である。PWO 結晶は、Ge 検出器を 240 度以上覆っている。PWO を格納する容器からは 4 本の等辺アングル 20×t3 が延びており、取り付けフランジと溶接される。コ型 PWO 容器は全て SUS304 で出来ている。なお、板の厚さは 1.5mm、上面フランジ部が 5mm である。ターゲット側の等辺アングルは、PMT 鉄管との干渉を避けるために逃げ加工が施されており、水平方向の荷重に対して弱い。しかし、この容器も水平方向での使用はないため、構造上の問題は無い。アングルには M4 が多数開いており、ケーブルや冷却ホースの固定に利用する。コ型用磁気シールド上面へは、Ge 検出器用  $\phi 90$  貫通穴、PMT 用  $\phi 34$  貫通穴、その他ネジ穴、溝が多数開いている。これらの穴は、PMT 用磁気シールドと PWO 結晶のサポート、鉄管やコネクタブラケットの取り

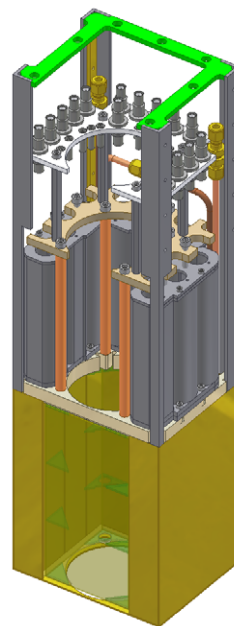
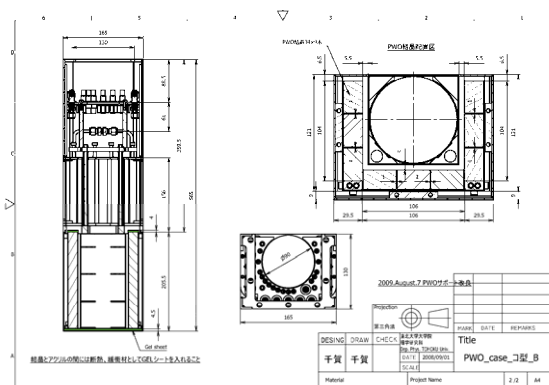


図10 コ型 PWO ケースの図面 (上) と 3D モデル (下)

付け等に使用する。PWO サポート用の溝は、3mm 厚の断熱材が入る構造となっている。磁気シールドは「8の字型」と同様に 16mm 厚の純鉄で製作する。磁気シールドのシミュレーションは行っていないが、設置場所は電磁石の磁場が中和する付近であるため、PMT の動作に関しては問題ないと考えられる。なお、コ型 PWO ケース全体の設計重量は約 16.3kg である。

### 3.4 「L 型」PWO ケースの設計と構造

L 型 PWO ケースは、外側ステージに取り付けられる。名称は、PWO 結晶の配置が「L 字型」から来ている。L 型 PWO ユニットは、PWO 結晶の配置の都合によりミラー対称となっている。従って、L 型 PWO ユニットは、ステージに対して「ねじれの位置」に取り付けられる。使用する PWO 結晶は、 $34 \times 20 : 3$  本、 $31 \times 20 : 3$  本で、結晶の総重量は約 5.6kg である。設計した L 型 PWO 容器は、遮光を考慮してターゲット側にわずかな板は残したものの、ほぼ板の無い構造である。この構造となった理由は、Ge 検出器から見た物質量を小さくする事と、容器を固定する梁の設置スペースが無い事に起因する。従って、容器からは等辺アングル  $20 \times t3$  が 3 本伸びており、上面フランジと接続される。L 型 PWO 容器は 3 点サポートでアンバランスに感じるが、PWO 結晶が挿入された場合の重心は、3 点サポートのほぼ中央に来る構造となっている。L 型 PWO 容器の PWO 結晶は、冷却板の構造から冷え辛い。そこで、断熱材の入る隙間を他の PWO ケースと比べて広くした。これにより、熱平衡までの時間はかかるものの、到達温度をより低く出来ると考えられる。等辺アングルは、PMT 用鉄管との干渉を防ぐために、逃げ加工が施されている。この場合も、他の PWO ケースと同様に水平方向からの力は加わらないため、強度も問題は無い。また、アングルには配線等の固定用 M4 タップ穴が多数開いている。L 型用磁気シールドは、他の PWO ケース用磁気シールドと同様の仕様と機能を有している。磁場については、設置場所によって大きく違うことから、磁気シールドが機能するかは難しい問題である。磁気シールドが機能しない場合は、HBJ フレームに設置した磁気シールドを変更しなければならない。なお、L 型 PWO ケース全体の重量は約 11.6kg である。

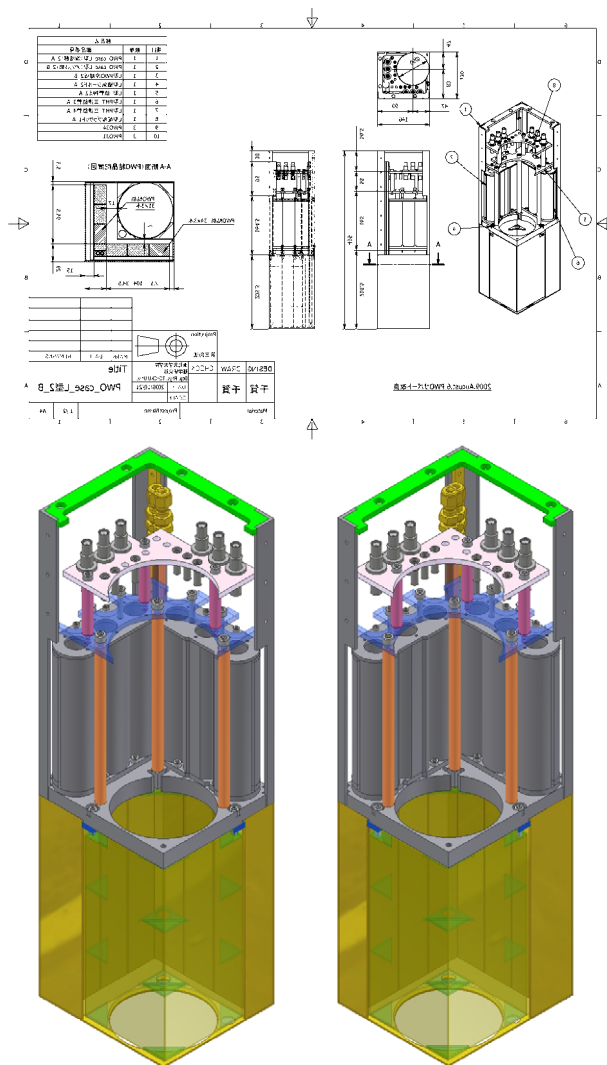


図 11 設計した L 型 PWO ケースの図面 (上) と 3D モデル

### 3.5 PMT 鉄管の設計

PWO 結晶が放出する微弱な光は、PMT により増幅、検出される。PMT は、非常に高感度だが磁場に弱い特性がある。PMT は、地磁気の影響さえも受ける。そのため、超伝導電磁石の近傍に設置される HBJ で使用





の穴が開いており、物質量を減らすだけではなく<sup>60</sup>Co パルサー等も挿入できる構造とした。構造計算を行った結果、PWO 結晶自身によるセルフサポートの効果もあり変形量は少ない。また、最大変形量は PWO ケース用磁気シールドに掘られた溝により 1mm 以上にはならない。8 の字型 PWO ケースへ用いるアクリルタワーのみは、2 つのタワーが分割できる構造となっており、8 の字型 PWO 容器へ容易に装填できる。テストベンチとして製作したタワーは、透明アクリルを使用していたが、光漏れが激しいことから黒アクリルへ変更した。アクリルタワーは、32 個必要である。一つのタワーの部品点数は、21 点である。従って、数量が非常に多い。特に三角板は 512 枚必要であり、手間がかかった。接着は、ABS 樹脂専用の接着剤（商品名：アクリダイン#3、主成分：メチレンクロライド）を使用した。接着方法は、台紙の上にアルミ板を置き、接着物を押し当てて接着剤を流し込んだ。接着剤は、毛細管効果を利用して浸透させた。測定の結果、接着後の誤差は、±0.5mm 以下となった。

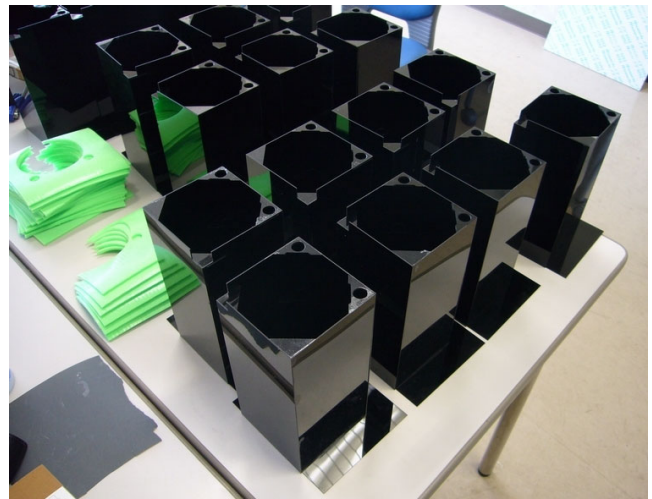


図 14 製作したアクリルタワー

### 3.7 PWO 結晶冷却板の設計と製作

PWO 結晶は、-40 度程度に冷却して用いる。PWO 結晶の冷却は、冷却された銅板に PWO 結晶を押し当てて行う。設計した冷却板は、ブロックユニットと板から構成される。図 15 に冷却板の構造を示す。ブロックユニットの構造は、ブロック内部にザグリ穴を開け、そこへ 2 本のパイプを挿入しカバーにより封をする。2 本のパイプはザグリ穴への挿入長が違っており、短い方（冷却棒上部）を OUT 側、長い方（冷却棒下部）を IN 側とした。上部を OUT、下部を IN とするやり方は、装置冷却の基本であり、冷却棒の均熱性を高めるものと考えられる。冷却ブロックは、パイプを溶接後にカバーを溶接し完成となる（ブロックユニット）。完成したブロックユニットは、銅板へ取り付けられる。取り付けの際、冷却ブロックの下部に開けたネジ穴を使用して固定すると、より正確に溶接が出来る構造となっている。冷却板は、各 PWO ケースの種類と数量分だけ製作する。製作個数は、6 種類、22 個である。使用する銅ブロックは 48 本である。なお、冷却板に使用する全ての材料は C1020 無酸素銅とした。冷却板の組み立ては、熱伝導や設置空間の関係により溶接とした。冷却板の溶接には、溶接温度が低く、取り扱いが容易なハンダを使用した。ハンダによる溶接は、極低温での信頼性に欠ける。しかし、PWO 結晶の冷却温度は-40 度程度のため、ハンダによる溶接でも問題にならない。なお、冷却板の接合箇所は、全て溶接を行った。以下に、冷却板の製作方法を示す。

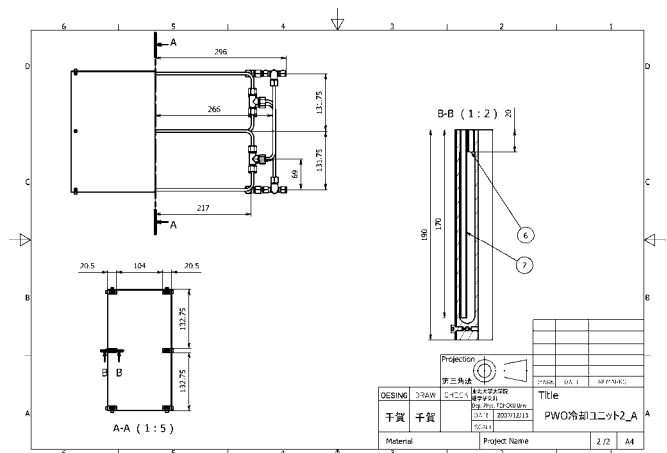


図 15 設計した PWO 冷却板の図面

冷却ブロックは、パイプを溶接後にカバーを溶接し完成となる（ブロックユニット）。完成したブロックユニットは、銅板へ取り付けられる。取り付けの際、冷却ブロックの下部に開けたネジ穴を使用して固定すると、より正確に溶接が出来る構造となっている。冷却板は、各 PWO ケースの種類と数量分だけ製作する。製作個数は、6 種類、22 個である。使用する銅ブロックは 48 本である。なお、冷却板に使用する全ての材料は C1020 無酸素銅とした。冷却板の組み立ては、熱伝導や設置空間の関係により溶接とした。冷却板の溶接には、溶接温度が低く、取り扱いが容易なハンダを使用した。ハンダによる溶接は、極低温での信頼性に欠ける。しかし、PWO 結晶の冷却温度は-40 度程度のため、ハンダによる溶接でも問題にならない。なお、冷却板の接合箇所は、全て溶接を行った。以下に、冷却板の製作方法を示す。

- 機械加工により銅ブロック、カバー、板を製作する。
- パイプをパイプカッターで切断し、内側のバリをハンドドリルで取り除く。
- 銅パイプをブロックへ差込み、フラックスを塗った後にハンダ溶接する。

- カバーをブロックへ取り付け、フラックスを塗った後にハンダ溶接する。
- 溶接したカバー面をフライス盤により 0.5mm 撫でる。(ブロックユニット)
- 銅板とブロックユニットを万力により固定する。固定は、万力とカバー部の間にアルミブロック、銅板と万力の間に銅ブロック廃材を入れる。
- ガスコンロの上に直火を避けるための銅板 (1mm 厚) を置き、その上に万力で固定したブロックユニットを置く。
- ゆっくりと温めて、ハンダ溶接を行う。

上記の溶接方法で特に重要な箇所は、直火を避けるための銅板の設置である。この板の設置は、失敗を基に考え出した技術である。熱を不均一に伝導させた場合、最初に溶接した箇所が溶け出したりする場合がある。一方、直火を避ける銅板を挟んだ場合は、直火側の銅板が熱の均一性を出す。更に、廃材の銅ブロックでも均熱帯を発生させるため、均一な加熱が可能である。

上面側のアルミ板は、放熱とカバーのサポートを兼ねている。上面をハンダが溶けない温度、下面を溶ける温度とすることがコツである。また、ゆっくり加熱することも重要である。溶接接合部にはみ出したハンダは、平ヤスリの先端を用いて削り落とす。完成した冷却板は、水によるリークテストをした後に、実際に使用を開始する。最大平均流量は、3L/min 程度である。PWO ケース内は、結露防止のための断熱処理を施しているが、外部の配管は断熱処理を行っていない。従って、配管の断熱はアーマフレックステープにより「後工程」として行う予定である。



図 16 PWO 冷却板の溶接

#### 4 まとめ

ステージは干渉もなく組み上がった。荷重をかけてのテストでは変形、変位は見られず、高い剛性を確認できた。PWO ケースの設計は、要求事項が多かったため時間がかかったが、干渉、断熱、剛性の問題を解決し、納得の行く出来上がりとなった。ハンダ溶接によって製作した冷却板は、「コツ」を掴むまで苦労したが、最終的に良い物ができた。今後は、未製作の部品 (コ型 PWO ケース、L 型 PWO ケース) の製作と、製作済み部品の組み立てを行う予定である。

#### 謝辞

ステージの製作と PWO 容器の溶接を行ってくださった理学研究科機器開発研修室の皆様へ感謝します。

#### 参考文献

- [1] 千賀信幸 HBJ 用 Ge 検出器防振機構、水冷化の設計製作 東北地区技術発表会 2008 年 8 月
- [2] 千賀信幸 大型ゲルマニウム検出器群架台の設計 東北地区技術発表会 2009 年 8 月
- [3] 三森雅弘 ハイパー核  $\gamma$  線分光用高速バックグラウンドサブレッサーの研究 2008 年度大学院理学研究科修士論文